

## СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ФАКЕЛОВ

**А. А. Соловьев**

*Главная астрономическая обсерватория РАН*

В лекции дается краткий обзор исследований свойств солнечных факелов. Обсуждаются имеющиеся модели факелов и их трудности. Излагается новая 3-мерная аналитическая модель факельного узла, разработанная автором в 2018 г. в виде магнитного «фонтана» со множеством тонких струек стационарных течений плазмы, отражающих магнитную структуру факела.

## THE STRUCTURE OF THE SOLAR TORCHES

**A. A. Solovjev**

*The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo*

The lecture gives a brief overview of the research of the properties of solar faculae. The available models of faculae and their difficulties are discussed. A new 3D analytical model of the steady facular knot, developed by the author in 2018 in the form of a magnetic “fountain” with numerous thin streams of the plasma mapping the magnetic structure of the facula, is presented.

Солнечные факелы, наряду с солнечными пятнами, являются важным и значимым проявлением солнечной активности в целом. Несмотря на их небольшую яркость, они, благодаря своей многочисленности, дают настолько существенный вклад в общую светимость Солнца, что Total Solar Irradiance (TSI) в моменты максимума пятенной активности оказывается выше (на 0.1 %), чем в минимуме, т. е. повышенная светимость факелов перекрывает понижение общей светимости Солнца, вызываемое появлением темных пятен. Это одна из причин, по которым в солнечной физике исследованию факелов традиционно уделяется большое внимание. Факелы, как и пятна, имеют магнитную природу, хотя их магнитные поля намного слабее, чем в пятнах. Очевидно, по этой причине факельные поля появляются в активной области раньше, чем формируются пятна, и живут дольше пятен. Принято считать, что в факельных областях на Солнце присутствуют три различных класса магнитных структур:

- а) мелкомасштабные магнитные элементы, отдельные тонкие трубки магнитного потока;
- б) факельные узлы;
- в) темные поры.

Первые из перечисленных структур имеют «гранулярные» масштабы: диаметр 0.5—1 угловой секунды и меньше, время жизни 5—10—15 мин, напряженность магнитного поля — близкая к полю равнораспределения (150—300 Гс). Эти элементы очень динамичны, находятся в постоянном движении, их яркость невелика и связана главным образом с тем, что фотосферные гранулы, взаимодействуя с магнитным полем, давление которого близко к динамическому давлению конвективного поля грануляции, поджимаются этим полем, дополнительно структурируются им и за счет этого увеличивают несколько свою яркость, просвечивая при проворачивании (overturning) своими боковыми поверхностями сквозь окружающие их более прозрачные магнитные силовые трубки. Физическая природа этих элементов хорошо симулируется численно в рамках представлений о магнитоконвекции.

Второй тип факельных элементов — факельные узлы — более яркие, относительно стабильные, долгоживущие (среднее время жизни 10—15 ч, иногда до одного дня и более) образования. Они имеют диаметры от 3 до 7 Мм и тонкую внутреннюю магнитную структуру (менее 1 Мм) — факельные гранулы. Их магнитное поле находится в диапазоне от 250 до 1 200 Гс. Факельные узлы живут, по-видимому, в местах стыков нескольких ячеек супергрануляции, и время их жизни на много порядков превышает время релаксации системы к равновесию (несколько минут). Поэтому данные структуры можно рассматривать как устойчивые образования, способные совершать колебания как целостные объекты около положения равновесия. Хотя в целом узлы имеют повышенную яркость, в них наблюдается центральное понижение температуры (типа Вильсоновской депрессии в солнечных пятнах) и в этом смысле они уже приближаются к порам — малым темным пятнам без полутени.

В факельных структурах наблюдаются квазипериодические колебания магнитного поля и интенсивности излучения. Относительно короткопериодические колебания с периодами от 3—5 до 15 мин естественно объясняются как проявления акустических и МГД-волн, распространяющихся в магнитных трубках, которые формируют эти объекты и служат волноводами и резонаторами. В факельных узлах, как долгоживущих (и, следовательно, достаточно устойчивых)

объектах, наблюдаются, наряду с короткопериодическими, и значительно более длинные периоды — от часа и более. Эти колебания следует уже рассматривать не как следствие пробегающих в них МГД-волн, а как колебания всей магнитной структуры в целом около положения ее устойчивого равновесия; в них вовлекаются значительные массы вещества и потому периоды этих колебаний оказываются достаточно большими. Для солнечного пятна этот колебательный процесс подробно описан нами в рамках модели неглубокого солнечного пятна.

Относительно медленные временные вариации магнитного поля уединенных, долгоживущих, компактных факельных узлов имеют специфические особенности. Они заключаются в том, что за время наблюдения, близкое к времени жизни узла, амплитуда и период колебаний его магнитного поля синхронно изменяются, т. е. вместе с ростом амплитуды увеличивается и период колебаний (первый режим) или с падением амплитуды падает и период колебаний (второй режим). Иногда наблюдается перемежающийся характер колебаний: интервалы роста амплитуды и периода сменяются интервалами падения амплитуды и периода (третий режим). Природа таких колебаний объясняется тем, что за время наблюдений, которое близко к времени жизни узла, его параметры (магнитное поле, площадь, занимаемая на магнитограмме и др.) могут заметно измениться, хотя при этом факел сохраняет свою структурную идентичность, т. е. легко отслеживается как самостоятельный уединенный объект на магнитограммах и интенситограммах активной области. Эти изменения изменяют и эффективную жесткость системы (величину отклика на внешние возмущения), что приводит к изменению характера самих колебаний. Таким образом, наблюдаемые колебания магнитного поля факельных узлов с периодами от 1 до 4 ч представляются нам как собственные малые колебания системы с изменяющейся во времени жесткостью (коэффициентом упругости). Все три специфических режима низкочастотных колебаний, обнаруженных в факельных узлах, хорошо описываются такой моделью. Интересно, что и для солнечных пор удастся обнаружить подобный тип колебаний.

Характерной особенностью хромосферных магнитных полей является наблюдаемая в линиях ионизованного кальция на уровне температурного минимума (около 500 км над уровнем фотосферы) очень тонкая пространственная структура, которая представляется совокупностью тонких арочных структур, образующих в хромосфере некоторое подобие «магнитного ковра». Исходя из этих наблюда-

тельных данных мы представляем модель факельного узла в виде магнитного фонтана с многочисленными очень тонкими «струями» плазмы, трассирующими магнитные силовые линии.

Развитая нами аналитическая МГД-теория позволяет рассчитать распределение давления, плотности, температуры газа, а также скорости стационарных течений плазмы в такой конфигурации на любой высоте в хромосфере Солнца. Расчеты температурных профилей показывают, что на уровне фотосферы факельные узлы, будучи в среднем ярче, чем фотосфера, имеют в центре некоторый провал температуры (аналог Вильсоновской депрессии в солнечных пятнах), что сближает их с порами — малыми пятнами без полутени. Факельные узлы на высотах температурного минимума и выше центрального провала в своих температурных профилях не имеют и всегда оказываются более горячими, чем окружающая их хромосфера на тех же высотах.

Одной из сложных проблем физики солнечных факелов является проблема изменения их яркости по мере перемещения от центра солнечного диска к лимбу (Center-Limb-Variation Problem). Широко распространенная модель «горячих стенок» дает нулевую светимость факелов на лимбе, в то время как в реальности наблюдается обратная картина: факелы лучше всего видны именно на краю диска! В нашей модели излучающая поверхность факела имеет как горизонтальную составляющую, которая меняется по закону  $\cos(\theta)$ , так и вертикальную, изменяющуюся по закону  $\sin(\theta)$ . Здесь  $\theta$  — угол между лучом зрения наблюдателя и нормалью к солнечной поверхности. Он равен нулю в центре диска и составляет  $90^\circ$  на лимбе. На лимбе горизонтальная излучающая поверхность дает нулевой вклад, а вертикальная поверхность — максимальный. Получаемая картина хорошо соответствует наблюдениям.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-02-00168.